Nicolae Sfetcu

Les singularités comme limites ontologiques de la relativité générale

Collection ESSAIS

MultiMedia Publishing

Les singularités comme limites ontologiques de la relativité générale

Nicolae Sfetcu

18.08.2019

Sfetcu, Nicolae, « Les singularités comme limites ontologiques de la relativité générale », SetThings (18 août 2019), MultiMedia Publishing (ed.), ISBN: 978-606-033-272-5, DOI: 10.13140/RG.2.2.28102.01606, URL = https://www.telework.ro/fr/e-books/les-singularites-comme-limites-ontologiques-de-la-relativite-generale/

Email: nicolae@sfetcu.com

Ceci est une traduction partielle de l'article :

Sfetcu, Nicolae, « The singularities as ontological limits of the general relativity », SetThings (June 1, 2018), MultiMedia Publishing (ed.), DOI: 10.13140/RG.2.2.14521.06241/1, ISBN: 978-606-033-136-0, URL = https://www.telework.ro/en/e-books/the-singularities-as-ontological-limits-of-the-general-relativity/

Abstract

Les singularités de la relativité générale résultant de la résolution des équations d'Einstein ont été et font encore l'objet de nombreux débats scientifiques : existe-t-il des singularités dans l'espace-temps ou pas ? Big Bang a été une singularité initiale ? Si les singularités existent, quelle est leur ontologie ? La théorie générale de la relativité est-elle une théorie qui a montré ses limites dans ce cas ?

Dans cet essai, je soutiens qu'il existe des singularités et que la théorie de la relativité générale, comme toute autre théorie scientifique à l'heure actuelle, n'est pas valable pour les singularités. Toutefois, comme le pensent certains scientifiques, cela ne signifie pas pour autant qu'il doit être considéré comme obsolète.

Après une brève présentation des aspects spécifiques de la théorie classique newtonienne et de la théorie de la relativité spéciale et une brève présentation de la théorie de la relativité générale, le chapitre *Ontologie de la relativité générale* présente les aspects ontologiques de la relativité générale. Le chapitre suivant, *Singularités*, est consacré à la présentation des singularités aboutissant à la relativité générale, aux aspects spécifiques des trous noirs et de l'horizon des événements, y compris le débat Big Bang en tant que singularité d'origine et aux arguments en faveur de l'existence de ces singularités. Dans l'*Ontologie des singularités*, je parle des possibilités d'encadrement ontologique des singularités en général et des trous noirs en particulier, de l'argument du trou mis en évidence par Einstein, et des arguments présentés par les scientifiques selon lesquels il n'y a pas de singularités et donc que la théorie générale de la relativité est dans l'impasse. Dans *Conclusions*, je décris et résume brièvement les arguments qui soutiennent mes vues ci-dessus.

Mots-clés : relativité générale, théorie de la relativité générale, Albert Einstein, singularités, trou noir, horizon des événements, Big Bang, cosmologie, gravité

Introduction

Les singularités de la relativité générale résultant de la résolution des équations d'Einstein ont été et font encore l'objet de nombreux débats scientifiques : existe-t-il des singularités dans l'espace-temps ou pas ? Big Bang a été une singularité initiale ? Si les singularités existent, quelle est leur ontologie ? La théorie générale de la relativité est-elle une théorie qui a montré ses limites dans ce cas ?

Dans cet essai, je soutiens qu'il existe des singularités et que la théorie de la relativité générale, comme toute autre théorie scientifique à l'heure actuelle, n'est pas valable pour les singularités. Toutefois, comme le pensent certains scientifiques, cela ne signifie pas pour autant qu'il doit être considéré comme obsolète. Pour cela, j'ai utilisé les études de plusieurs physiciens et philosophes : Thomas A. Ryckman, *Early Philosophical Interpretations of General Relativity*, (Ryckman 2018) Don A. Howard, *Einstein's Philosophy of Science*, (D. A. Howard 2017) John D. Norton, *What Can We Learn about the ontology of Space and Time from the Theory of Relativity?*, (Norton 2012) Robert Weingard, *On the ontological Status of the Metric in General Relativity*, (Weingard 1976) Vincent Lam and Michael Esfeld, *The Structural Metaphysics of Quantum Theory and General Relativity*, (Lam and Esfeld 2012) Erik Curiel and Peter Bokulich, *Singularities and Black Holes*, (Curiel and Bokulich 2018) Gustavo E. Romero, *The ontology of General Relativity*, (Romero 2013c) *Philosophical Issues of Black Holes* (Romero 2014) et *Adversus singularities: The ontology of space-time singularities*, (Romero 2013a) Nick Huggett and Carl Hoefer, *Absolute and Relational Theories of Space and Motion*, (Huggett and Hoefer 2018) Christopher Smeenk and George Ellis, *Philosophy of Cosmology*, (Smeenk and Ellis 2017) Alan D. Rendall, *The nature of spacetime singularities*, (Rendall 2005) Erik Curiel, *The Analysis of Singular Spacetimes* (Curiel 1999) et C. J. S. Clarke, *Space-Time singularities.* (Clarke 1976)

Après une brève présentation des aspects spécifiques de la théorie classique newtonienne et de la théorie de la relativité restreinte, et une brève présentation de la théorie de la relativité générale,

le chapitre *L'ontologie de la relativité générale* présente les aspects ontologiques de la relativité générale. Le chapitre suivant, *Singularités*, est consacré à la présentation des singularités aboutissant à la relativité générale, aux aspects spécifiques des trous noirs et à l'horizon des événements, y compris le débat Big Bang en tant que singularité d'origine et aux arguments en faveur de l'existence de ces singularités. Dans l'*Ontologie des singularités*, je parle des possibilités d'encadrement ontologique des singularités en général et des trous noirs en particulier, de l'argument du trou mis en évidence par Einstein, et des arguments présentés par les scientifiques selon lesquels il n'y a pas de singularités et donc que la théorie générale de la relativité est dans l'impasse. Dans *Conclusions*, je décris et résume brièvement les arguments qui soutiennent mes vues ci-dessus.

La théorie classique et la relativité restreinte

La gravité classique newtonienne admet une description géométrique. Avec la relativité restreinte, il permet une description heuristique de la relativité générale (RG). Le mouvement inertiel en mécanique classique est lié à la géométrie de l'espace et du temps, pratiquement le long des géodésiques dans lesquelles les lignes du monde sont des lignes droites dans l'espace-temps relativiste. (Ehlers 1973) En raison du principe d'équivalence entre les masses inertielle et gravitationnelle, lorsqu'on considère la gravité, aucune distinction n'est faite entre le mouvement inertiel et la gravité. Cela permet de définir une nouvelle classe de corps en chute libre, définissant une géométrie de l'espace et du temps par un mouvement géodésique dépendant du gradient du potentiel gravitationnel. D'où la théorie de Newton-Cartan, une formule géométrique de la gravité newtonienne dans un espace-temps incurvé utilisant uniquement des concepts covariants. (Ehlers 1973) (Havas 1964)

La gravité géométrique newtonienne est un cas limite de la mécanique relativiste spéciale. Là où la gravité peut être négligée, la physique est un invariant Lorentz comme dans la relativité plutôt qu'un invariant Galilée comme dans la mécanique classique. (Giulini 2006)

La symétrie Lorentz implique des structures supplémentaires à travers des cônes de lumière définissant une structure causale[1]. Les cônes de lumière peuvent être utilisés avec les lignes du monde pour les corps en chute libre pour reconstruire la métrique espace-temps semi-riemannien, au moins jusqu'à un facteur scalaire positif, donnant une structure (ou géométrie) conforme.

Si la gravité est prise en compte, les lignes droites temporelles définissant un cadre inertiel sans gravité sont courbes, ce qui entraîne une modification de la géométrie de l'espace-temps. (Schutz and Schutz 1985)

Le temps correct mesuré avec des horloges dans un champ gravitationnel ne suit pas les règles de la relativité restreinte (il n'est pas mesuré par la métrique de Minkowski), ce qui nécessite une géométrie courbe plus générale de l'espace, avec une métrique pseudo-riemannienne naturellement associée à un certain type de connexion, la connexion Levi-Civita, qui satisfait au principe d'équivalence et rend l'espace local minkowskien. (Ehlers 1973)

En novembre 1915, à l'Académie des sciences de Prusse, Einstein a présenté les équations de champ[2] incluant la gravité, qui spécifient comment la géométrie de l'espace et du temps est influencée par la matière et le rayonnement.

[1] Pour chaque événement A, il existe un ensemble d'événements d'observateurs indépendants qui peuvent, en principe, influencer ou être influencés par A par le biais de signaux ou d'interactions ne devant pas voyager plus vite que la lumière, ainsi qu'un ensemble d'événements pour lesquels cette influence est impossible.

[2] Les équations de champ d'Einstein :

$$G_{\mu\nu} \equiv R_{\mu\nu} - (1/2)Rg_{\mu\nu} = (8\pi G/c^4)T_{\mu\nu}$$

où $G_{\mu\nu}$ est le tenseur d'Einstein, une combinaison spécifique sans distinction entre le tenseur de Ricci $R_{\mu\nu}$ et les métriques, et $T_{\mu\nu}$ est le tenseur énergie-impulsion. La constante de proportionnalité peut être fixée à $k = 8\pi G/c^4$, où G est la constante gravitationnelle et c la vitesse de la lumière. Dans le vide, $R_{\mu\nu} = 0$.

La relativité générale

Selon la relativité générale (RG), la force gravitationnelle est une manifestation de la géométrie de l'espace-temps local. RG est une théorie métrique de la gravité. Il est basé sur les équations d'Einstein, qui décrivent la relation entre la géométrie d'une variété pseudo-riemannienne à quatre dimensions, représentant l'espace-temps et l'énergie-impulsion contenu dans cet espace-temps. La gravité correspond aux modifications des propriétés spatiales et temporelles, qui à leur tour modifient les chemins des objets. La courbure est causée par l'énergie-impulsion de la matière. Selon John Archibald Wheeler, l'espace-temps indique à la matière comment se déplacer, et la matière indique à l'espace-temps comment se courber. (Wheeler 1990) Pour les champs gravitationnels faibles et les vitesses faibles par rapport à la vitesse de la lumière, les prédictions de la théorie convergent vers celles de la loi de la gravité universelle de Newton.

RG montre une covariance générale (les lois ont la même forme dans tous les systèmes de coordonnées) et ne contiennent pas de structures d'arrière-plan géométriques invariantes (elles sont indépendantes de la forme réelle de l'espace-temps et de la valeur des divers champs). Fondamentalement, le principe d'équivalence est valable au niveau local, l'espace-temps est minkowskien et les lois de la physique manifestent l'invariance locale de Lorentz. (Weinberg 1972)

En RG, la matière et la géométrie doivent satisfaire les équations d'Einstein. Une solution à ces équations est un modèle d'univers avec d'éventuelles lois supplémentaires régissant la matière. Les solutions exactes les plus connues sont celles qui correspondent à un certain type de trou noir dans un univers vide (Chandrasekhar 1998) (la solution de Schwarzschild, la solution de Reissner-Nordstrom et la métrique de Kerr), qui décrivent un univers en expansion (les univers Friedmann-Lemaitre-Robertson-Walker et Sitter), l'univers Gödel (avec la possibilité de voyager dans le temps), la solution Taub-NUT (modèle d'univers homogène mais anisotrope) et l'espace anti-Sitter

(récemment mis en évidence dans le contexte de la conjecture de Maldacena). (S. W. Hawking and Ellis 2008)

Dans la gravité newtonienne, la source de gravité est la masse et, en relativité spéciale, la masse fait partie d'une quantité plus générale appelée tenseur énergie-impulsion, qui comprend à la fois la densité d'énergie et la densité d'impulsion, ainsi que les contraintes (pression et cisaillement). En RG, l'équation du champ de gravité fait référence à ce tenseur et au tenseur de Ricci qui décrit une certaine classe d'effets de marée.

Il existe des théories alternatives aux RG construites sur les mêmes concepts, avec différentes règles et/ou contraintes résultant d'équations de champs différentes (théorie de Whitehead, théorie de Brans-Dicke, téléparalalélisme, gravité f(R), théorie d'Einstein-Cartan, etc.). (Brans and Dicke 1961)

1. Ontologie de la relativité générale

Dans la vision classique, l'espace et le temps sont des conteneurs ; la matière est le contenu. La propriété distinctive de la matière est qu'elle transporte de l'énergie et des impulsions, préservée dans le temps, ce qui donne à ces impulsions un caractère ontologique fondamental. (Norton 2012)

La relativité générale (RG) a généré diverses interprétations philosophiques anciennes. Ses adhérents ont mis en avant la « relativisation de l'inertie » et le concept de simultanéité, les kantiens et les néo-kantiens ont souligné l'approche de certaines « formes intellectuelles » synthétiques (en particulier le principe de covariance générale), et les empiriques logiques ont souligné la signification philosophique méthodologique de la théorie.

Reichenbach a abordé RG à travers la thèse de la « relativité géométrique », en essayant de construire une « axiomatisation constructive » (Rendall 2005) basée sur des « problèmes élémentaires de fait » (*Elementaratbestande*) concernant le comportement observable des rayons lumineux, des tiges et montres.

Le mathématicien Hermann Weyl a tenté de reconstituer la théorie d'Einstein en se basant sur l'épistémologie d'une « géométrie infinitésimale pure », une géométrie étendue avec des termes supplémentaires qui s'identifiaient formellement au potentiel du champ électromagnétique. (Weyl and Weyl 1993, 115–16)

Thomas Ryckman déclare que le programme de la théorie des champs géométriques unifiés semble être inséparablement encadré dans une forme de réalisme scientifique, appelée « réalisme structurel », avec une tendance possible inspirée du platonisme. (Ryckman 2018) Dans sa forme contemporaine, le réalisme structurel a une forme épistémique et une forme « ontique », cette dernière affirmant essentiellement que les théories physiques actuelles justifient le fait que les caractéristiques structurelles du monde physique sont des fondements ontologiques, (Ladyman and Ross 2007) souscrivant à l'idée que la seule continuité ontologique en termes de changements dans la théorie physique fondamentale est la continuité de la structure. Le réalisme structurel ontique est un cadre métaphysique qui fournit une compréhension adéquate des caractéristiques des théories physiques fondamentales. Selon lui, il existe des structures dans le domaine de la physique fondamentale au sens de réseaux de relations physiques concrètes, sans que ces relations dépendent de objets physiques fondamentaux possédant une identité intrinsèque, c'est-à-dire une identité constituée de propriétés intrinsèques ou d'une primitivité (eccéité). Cette position peut prendre en compte de manière significative les caractéristiques du GR fondamental de l'invariance du difféomorphisme et de l'indépendance de fond. (Esfeld and Lam 2008)

Certains philosophes voient une opposition entre la métaphysique traditionnellement engagée dans une priorité ontologique des objets sur les relations et le réalisme structurel ontique dédié à une priorité ontologique des relations d'objet. Les partisans du réalisme structurel ontique pensent que l'erreur qui conduit à cette conclusion réside dans la supposition de l'existence d'une distinction ontologique entre les objets, d'une part, et la propriété, y compris les relations, de l'autre. (Esfeld and

Lam 2011) Ils considèrent qu'il n'y a pas de distinction ontologique entre les objets et les propriétés, y compris les relations, et donc pas de relation de dépendance ontologique entre les objets et les propriétés, y compris les relations, il n'y a donc pas de problème de priorité ontologique. La distinction n'est que conceptuelle, (Lam and Esfeld 2012) ce serait une erreur de déduire de cette forme de représentation qu'il existe des points spatio-temporels dans le monde en tant qu'entités distinctes ontologiquement des propriétés du champ métrique. Il s'ensuit que l'hypothèse d'une distinction ontologique entre objets et propriétés, y compris les relations, doit être abandonnée. Il n'y a pas de distinction ontologique entre les objets et leurs manières d'être, mais seulement une distinction conceptuelle.

Les empiristes logiques antimétaphysiques, tels que Carnap, et les néo-kantiens, tels que Cassirer (qui considérait la théorie comme un test crucial pour *Erkenntniskritik*, terme privilégié pour l'épistémologie des sciences physiques de l'idéalisme transcendantal de Marx) ont joué un rôle important dans les débats sur l'ontologie de la relativité générale et le développement du concept moderne de catégorisation en sémantique formelle. (D. Howard 1996) Cassirer a conclu que RG présente « l'application et la réalisation les plus déterminées dans la science empirique de la position de l'idéalisme critique ». (Cassirer 1921)

Einstein, en collaboration avec Schlick et Reichenbach, a développé une nouvelle forme d'empirisme, appropriée à l'argumentation de la relativité générale contre la critique néo-kantienne. (Schlick 1921) (H. Reichenbach 1928)

L'idée de Mach selon laquelle la masse et le mouvement inertiel du corps résultent de l'influence de toutes les autres masses environnantes (en éliminant le concept d'espace absolu) a fortement influencé Einstein dans la tentative épistémologique de généraliser le principe de relativité, combinant un principe valide d'invariance des formes de lois naturelles (covariance générale) avec une fausse « relativité générale » de mouvements accélérés. (Ryckman 2018)

Einstein n'était pas un réaliste scientifique, mais il pensait qu'il y a un contenu théorique au-delà du contenu empirique, que la science théorique nous ouvre une fenêtre sur la nature, même si en principe il n'y aurait pas une seule explication correcte au niveau de l'ontologie profonde. (D. A. Howard 2017)

Dans ce contexte, la nature et le rôle des conventions en science ont fait l'objet d'un débat permanent jusqu'à la fin de la vie d'Einstein, (Schilpp and Schilpp 1959) si le choix de la géométrie est empirique, conventionnel ou a priori. Duhem (Duhem, Vuillemin, and Broglie 1991) estime qu'en physique les hypothèses ne sont pas testées isolément, mais seulement dans le cadre de la théorie dans son ensemble (holisme théorique et sous-estimation du choix de la théorie par des preuves empiriques). Dans un discours à Max Planck en 1918, Einstein aborda la question de la sous-détermination :

> « La tâche ultime du physicien est ... de rechercher les lois fondamentales les plus générales à partir desquelles l'image du monde doit être obtenue par pure déduction. Aucun chemin logique ne mène à ces lois fondamentales ; ce n’est que l’intuition qui repose sur une compréhension empathique de l’expérience. Dans cet état d’incertitude méthodologique, on peut penser qu’il est arbitrairement possible de recourir à de nombreux systèmes équivalents de principes théoriques ; et cette opinion est, en principe, certainement correcte. Mais le développement de la physique a montré que, parmi toutes les constructions théoriques imaginables, une seule se révélait toujours supérieure à toutes les conditions. Aucun de ceux qui ont approfondi ce sujet ne niera que, dans la pratique, le monde des perceptions détermine sans ambiguïté le système théorique, même si aucune voie logique ne mène des perceptions aux principes de base de la théorie. » (Einstein 1918, 31)

Einstein a expliqué pourquoi le choix théorique est déterminé de manière empirique dans une lettre adressée à Schlick, dans laquelle il a utilisé l'argument de Schlick sur les éléments d'une ontologie théorique :

> « Il me semble que le mot « réel » est pris de différentes manières, selon qu'il s'agit d'impressions ou d'événements, c'est-à-dire des états des affaires au sens physique.

> « Si deux personnes différentes suivent une physique indépendante, elles créeront des systèmes en accord avec les impressions (« éléments » au sens de Mach). Les constructions mentales faites par la variété pour relier ces « éléments » peuvent être très différentes. Les deux bâtiments ne doivent pas s'accorder sur des « événements »; parce qu'ils appartiennent certainement à des

constructions conceptuelles. Bien sûr, en ce qui concerne les « éléments », mais pas les « événements », ils sont réels dans le sens où ils sont « inévitablement donnés dans l'expérience.

« Mais si nous désignons comme « réels » ce que nous organisons dans le schéma spatio-temporel, comme vous l'avez fait dans la théorie de la connaissance, alors sans aucun doute, les « événements » sont avant tout réels ... Je voudrais recommander une distinction conceptuelle claire ici. » (D. A. Howard 2017)

Le point de vue d'Einstein, selon lequel la réalité physique consiste exclusivement en ce qui peut être construit sur des coïncidences espace-temps, les points espace-temps, par exemple, étant considérés comme des intersections des lignes de l'univers, est désormais appelé « argument de coïncidence ». (D. A. Howard 2017) Les coïncidences ont donc un rôle ontique privilégié car elles sont invariantes et donc déterminées de manière univoque.

La nouvelle perspective d'Einstein sur l'ontologie espace-temps a amené Schlick à affirmer que Mach considérait à tort que seuls les éléments de la sensation étaient réels, les événements spatio-temporels étant invariablement individualisés comme des coïncidences dans l'espace, ayant également le droit d'être pris en compte réel en raison de la manière univoque de leur détermination. (D. A. Howard 2017) Einstein a accepté, à condition qu'ils distinguent entre les deux types de réalité, les éléments et les événements spatio-temporels, que « deux personnes différentes » qui poursuivaient la physique indépendamment, seront d'accord sur les éléments, mais seront en désaccord avec l'ontologie de l'événement espace-temps.

Immédiatement après l'apparition de RG, il a été question d'une réduction de la physique à la géométrie : « la physique est une pseudo géométrie à quatre dimensions [c'est-à-dire une géométrie qui distingue les dimensions spatiale et temporelle] et dont la détermination métrique est liée, selon les équations fondamentales ... de ma contribution [1915], des quantités électromagnétiques, c'est-à-dire de la matière. (Hilbert 1917, 63)

Dans RG, la densité d'énergie et l'impulsion non gravitationnelle d'un événement sont représentées par le tenseur énergie-impulsion de la matière (**T**), la structure qui code les densités

d'énergie totale et les impulsions dues à toutes les formes non gravitationnelles. Einstein a défini une grandeur analogique, le tenseur énergie-impulsion pour le champ gravitationnel (**t**). T est un vrai tenseur, mais t est un pseudo tenseur, ce qui signifie que **T** peut être représenté indépendamment d'un système de coordonnées particulier, contrairement à **t**. Ainsi, aucun changement dans le système de coordonnées ne peut faire disparaître **T**, par opposition à **t** pouvant être annulée pour un certain événement. (Norton 2012) L'énergie totale et l'impulsion du système ne sont plus bien définies.

Dans RG, « l'énergie du champ gravitationnel ne peut pas être localisée ». Nous ne pouvons parler que de l'énergie gravitationnelle et de l'impulsion d'un système étendu, pas de la densité de l'énergie et de l'impulsion gravitationnelle lors d'un événement donné. (Misner et al. 2017, 20.3-20.4)

De plus, RG n'offre plus une notion précise de la force gravitationnelle, celle-ci étant « géométrisée ». La restauration de l'espace temporel de Minkowski dans les régions plates asymptomatiques de l'espace permet d'utiliser les ressources de la relativité restreinte pour réintroduire la notion de force gravitationnelle, identifiée aux perturbations géométriques de la structure métrique de la planéité exacte requise par un espace-temps de Minkowski. (Norton 2012)

La métrique (structure métrique) espace-temps de la matière dans RG est réductible au comportement des entités matérielles (horloges, rayons, lumière, géodésique, etc.) de l'espace-temps. (Grünbaum 2012) Respectivement, la mesure espace-temps dépend toujours d'instruments de mesure choisis comme étalons de mesure et les relations métriques font intervenir les étalons choisis. Il s'ensuit que les relations métriques entre le contenu matériel de l'espace-temps ne sont pas expliquées par la métrique spatio-temporelle, mais plutôt constitutives. En même temps, dans la métrique du champ physique, les relations métriques d'un espace-temps sont déterminées par un champ physique irréductible, le champ tenseur métrique de second ordre, qui, bien que séparé des entités matérielles de l'espace-temps, explique les relations métriques entre ces entités. (Weingard 1976)

De ce point de vue, le statut épistémologique de notre conviction qu'il existe un champ métrique tensoriel est identique à celui de nos croyances sur d'autres entités théoriques, telles que les neutrinos. Comme nous postulons l'existence d'un neutrino pour expliquer le déficit énergétique observé dans la dégradation bêta, nous postulerons le champ métrique pour expliquer les différents phénomènes observés, par exemple pourquoi les particules libres dans un champ gravitationnel ont les trajectoires qu'elles ont. Et dans ce processus, le champ de tenseurs métriques aide à expliquer les relations métriques observées entre les entités matérielles. Robert Weingard affirme qu'il existe un désaccord ontologique entre les deux métriques, le premier étant constitué par les relations entre les entités matérielles dans l'espace-temps, tandis que le second est un champ physique autonome, distinct et indivisible au contenu matériel de l'espace-temps.

Selon Robert Weingard, la métrique du champ physique fournit un rapport plus approprié de l'état ontologique des métriques dans l'espace-temps de RG. Selon cette thèse, un espace-temps vide avec une métrique bien définie est parfaitement compréhensible. Cette idée a été contredite par Grünbaum:

« S'il n'y a pas d'entités physiques extra-géocronométriques qui spécifient (individualisent) les éléments homogènes de l'espace-temps. . . d'où proviennent ces éléments de constitution ponctuelle équivalente, ou leur identité individuelle ? Les points du monde ne devraient-ils pas être individualisés avant que la manifestation de l'espace-temps puisse même être comprise comme ayant une certaine valeur ? Je ne vois pas de réponse à cette question sur le principe d'individualisation ici dans l'ontologie de l'identité leibnizien d'indiscernable. Je ne connais aucune autre ontologie qui apporte une réponse intelligible à ce problème particulier d'individualisation d'individus homogènes. » (Grünbaum 1970)

Depuis 2000, une nouvelle approche de la nature des structures espace-temps a été mise en place, notamment dans le travail d'Oliver Pooley (Pooley 2012) et Harvey Brown. (Brown 2015) L'approche dynamique affirme que la structure spatio-temporelle de notre monde est due aux lois dynamiques (fondamentales) de leur nature et de leur symétrie, la structure espace-temps étant dérivée. Une géométrie donnée pour l'espace-temps contraint formellement les théories acceptées à celles présentant une symétrie droite. Une hypothèse de nombreux fondateurs était que cette contrainte

n'était pas simplement formelle mais ontologique : la géométrie (d'où la manifestation elle-même) est plus fondamentale que les lois, ou que la géométrie fournit une explication « réelle » de la forme des lois. (John Earman 1992, 125) Mais la symétrie pourrait être inversée pour que cette dernière soit déterminée ontologiquement par les lois de la théorie, ce qui donnerait à la géométrie elle-même une expression de la dynamique de la matière. (Huggett and Hoefer 2018)

Gustavo E. Romero affirme que RG est une « théorie de l'espace et du temps ». (Misner et al. 2017) L'espace-temps est l'émergence de la composition ontologique de tous les événements, (Romero 2013c) étant représenté par un concept avec une représentation en 4 dimensions d'un champ métrique.

2. Singularités

Dans la théorie classique de la gravité de Newton, il y a la possibilité fondamentale d'une singularité. Aucun signal ne peut se propager à l'intérieur d'une singularité, mais son influence gravitationnelle est présente en permanence à l'extérieur et ne dépend que de la quantité totale de masse, du moment cinétique et de la charge électrique de la singularité. Les singularités peuvent être détectées par l'influence de leur forte gravité dans le voisinage immédiat.

Dans la théorie classique de la gravitation de Newton, un argument énergétique nous dit qu'il existe une vitesse de fuite à la surface de tout objet.

Dans la théorie newtonienne, la gravité est décrite par le potentiel. De même, dans la relativité générale (RG), la solution externe symétrique (indépendante du temps), appelée espace-temps de Schwarzschild, ne dépend que de la masse de l'objet interne. Le rayon de Schwarzschild dans la relativité générale est le rayon maximum d'une surface en dessous de laquelle la lumière ne peut s'échapper à l'extérieur. Ce « rayon de l'horizon » est, par coïncidence, identique au rayon critique des objets dans les « singularités » newtoniennes.

Les singularités gravitationnelles dans la relativité générale sont des emplacements dans l'espace-temps où le champ gravitationnel devient infini. Les courbes scalaires invariantes de l'espace-

temps incluent une mesure de la densité de la matière. Certains physiciens et philosophes estiment que, du fait que la densité de la matière tend vers l'infini dans la singularité, les lois de l'espace-temps ne sont plus valables là-bas.

Le Big Bang (BB) est une singularité gravitationnelle acceptée presque unanimement en astrophysique et en cosmologie, en tant que premier état de l'univers. (Wald 1984) Les lois connues de la physique ne sont pas valables dans ce cas non plus. (S. Hawking 2012)

La relativité générale prédit que tout objet s'effondrant au-delà d'un certain point (pour les étoiles, le rayon de Schwarzschild) forme un trou noir (TN) avec une singularité, avec une limite d'action définie par un horizon d'événements (HE). (Curiel and Bokulich 2018) Les théorèmes de singularité de Penrose-Hawking stipulent que, dans ce cas, les géodésiques aboutissent dans la singularité. (Moulay 2012)

La théorie de la gravitation quantique à boucles suggère que les singularités ne peuvent pas exister (Gambini, Olmedo, and Pullin 2013) car, du fait des effets de la gravité quantique, il existe une distance minimale au-delà de laquelle la force de gravité n'augmente plus.

La solution de Schwarzschild aux équations du RG décrit un TN non tournant, non chargé. Dans les systèmes de coordonnées appropriés, une partie de la métrique devient infinie à l'origine. Dans un TN en rotation (TN Kerr), la singularité apparaît sur un anneau, qui pourrait théoriquement devenir un « trou de ver ». (Wald 1984)

Un type particulier de singularité est la « singularité vide » qui, bien qu'interdit par l'hypothèse de la censure cosmique, en 1991, les physiciens Stuart Shapiro et Saul Teukolsky ont simulé sur ordinateur un plan de rotation de la poussière cosmique permettant à RG de permettre des singularités « vides ». (Goswami, Joshi, and Singh 2005) En fait, l'hypothèse de la censure cosmique stipule qu'il

peut exister des singularités réalistes (sans symétries parfaites, matière avec des propriétés réalistes), mais qu'elles sont cachées derrière l'horizon et donc invisibles[3]. (Wald 1984)

Stephen Hawking a suggéré que TN puisse émettre de l'énergie, préservant ainsi l'entropie et résolvant les problèmes d'incompatibilité avec la deuxième loi de la thermodynamique. Cela signifie que les TN ont une vie cosmique limitée.

Paul Townsend affirme que les singularités sont une caractéristique générique de la GR et sont inévitables si un organisme a dépassé un certain stade (Townsend 1997) et, auusi, au début d'une vaste catégorie d'univers en expansion. (S. W. Hawking 1966) La structure générique de ces entités (par exemple, la conjoncture BKL) est actuellement à l'étude. (Berger 2002)

En ce qui concerne la définition des singularités, le désaccord est clair : bien que cela modifie la géométrie locale, il semble difficile d'en parler comme d'une chose qui se trouve à un certain endroit dans l'espace-temps, c'est pourquoi certains physiciens et philosophes proposent de parler de l'« espace-temps singulier » au lieu de « singularités ». Les définitions les plus importantes font référence soit à des chemins incomplets, soit à l'idée de « points manquants » dans l'espace-temps, soit à une idée combinant les deux concepts ci-dessus, respectivement d'une structure singulière à comportement « pathologique » (déformation de l'espace-temps qui se manifeste lui-même comme un champ gravitationnel). (Curiel and Bokulich 2018)

2.1 Trous noirs

Les trous noirs (TN) soulèvent des problèmes conceptuels. Bien que ce soient des régions de l'espace-temps, les TN sont aussi des entités thermodynamiques, avec une température et une entropie

[3] Les restrictions des singularités du futur excluent les singularités initiales, telles que le Big Bang, qui sont en principe visibles pour les observateurs à un moment cosmique ultérieur. La conjecture de la censure cosmique a été présentée pour la première fois par Penrose dans un article datant de 1969. (Penrose 1969)

; et l'évolution des TN est apparemment en conflit avec la physique quantique standard car elle exclut une entropie croissante. (Curiel and Bokulich 2018)

Au centre d'un TN dans la GR, il y a une singularité gravitationnelle, une région dans laquelle la courbure de l'espace-temps devient infinie. La singularité contient toute la masse de TN, ce qui donne une densité infinie. (Carroll and Carroll 2004) Dans le cas d'un trou noir chargé (Reissner-Nordström) ou rotatif (Kerr), il est possible d'éviter la singularité, mais apparaît la possibilité hypothétique de sortir du TN dans un espace-temps différent, le TN agissant comme un trou de ver, et donc la possibilité de voyager dans un autre univers ou dans le temps. Droz considère cette possibilité uniquement comme théorique, car toute perturbation la détruirait. (Droz, Israel, and Morsink 1996) La possibilité de l'existence des courbes de temps fermées autour de la singularité Kerr conduit à des problèmes de causalité tels que le paradoxe du grand-père. (Sfetcu 2018)

Selon Kerr, à l'heure actuelle la plupart des chercheurs dans le domaine estiment qu'il n'y a pas d'obstacle à la formation d'un HE d'un TN. (Kerr 2007) Penrose a démontré l'inévitabilité des singularités dans certaines conditions. (Penrose 1965) La solution de Kerr, le théorème de calvitie et les lois de la thermodynamique du TN ont montré que les propriétés physiques du TN étaient simples et intelligibles. (S. W. Hawking and Penrose 1970)

Le TN de masse stellaire est formé par l'effondrement gravitationnel des étoiles lourdes. Une autre théorie est celle du début du TN après l'effondrement des étoiles dans l'univers primitif, et que des TN supermassifs pourraient s'être formés à partir de l'effondrement direct des nuages de gaz dans l'univers primitif. (Pacucci et al. 2016)

Le 14 septembre 2015, l'observateur de LIGO a observé l'existence d'ondes gravitationnelles (LIGO Scientific Collaboration and the Virgo Collaboration 2016) issues de la fusion de deux TN, ce qui constitue la preuve la plus concrète de l'existence des TN jusqu'à présent. Le 15 juin 2016, une deuxième détection d'un événement d'onde gravitationnelle provenant de la collision des TN a été

annoncée. (Overbye 2018) En avril 2018, LIGO a observé six événements d'ondes gravitationnelles résultant de la fusion des TN.

2.1.1 Horizon des événements

La caractéristique déterminante d'un TN est l'apparition d'un horizon des événements (HE) - une limite dans l'espace à travers laquelle la matière et la lumière ne peuvent passer que dans une direction, vers l'intérieur de la masse du trou noir. (Arnowitt, Deser, and Misner 1962)

La surface du HE est au rayon de Schwarzschild pour un corps non-rotatif proportionnel à sa masse. La masse minimale requise pour qu'une étoile s'effondre au-delà du HE est la limite Tolman-Oppenheimer-Volkoff, qui est d'environ trois masses solaires. Les astronomes ne peuvent détecter que les disques d'accrétion autour des trous noirs, où la matière se déplace à une vitesse telle que le frottement crée un rayonnement de haute énergie pouvant être détecté. De plus, une partie du matériau de ces disques d'accrétion est forcée de s'écouler le long de l'axe de rotation du TN, créant des jets visibles lorsqu'ils interagissent avec la matière.

Le concept de masse dans la GR est un problème, car la théorie ne fournit pas une définition unique du terme, mais plusieurs définitions différentes (énergie de Hawking, énergie de Geroch, impulsion d'énergie quasi-locale Penrose, etc.) applicable dans différentes circonstances. Fondamentalement, il est impossible de trouver une définition générale de la masse totale du système (ou de l'énergie) dans la GR, car « l'énergie du champ gravitationnel » ne fait pas partie du tenseur impulsion-énergie. On espère que dans l'avenir on utilisera une masse quasi locale bien définie pour donner une formulation plus précise de l'inégalité de Penrose pour les trous noirs (reliant la masse de TN à l'horizon) et pour trouver une version quasi locale des lois de la mécanique des trous noirs. (Szabados 2004)

2.2 Big Bang

La théorie de Big Bang (BB) en cosmologie explique la formation de l'univers (Overbye 2017) et son expansion à partir d'un état initial de densité et de température très élevées. BB explique un large éventail de phénomènes, notamment l'abondance d'éléments légers, le fond diffus cosmologique, la structure à grande échelle et la loi de Hubble. (Wright 2009) Fondamentalement, BB est une singularité initiale, (Roos 2008) la « naissance » de l'univers.

Le problème est que, bien que ces résultats établissent l'existence d'une singularité initiale, ils ne fournissent pas beaucoup d'informations sur sa structure. Il existe des résultats partiels pour les classes restreintes de solutions, par exemple les simulations numériques, mais l'image résultante de la singularité initiale contraste avec celle des modèles FLRW. De plus, il peut y avoir des singularités non scalaires. (Ellis and King 1974)

À propos du moment zéro du Big Bang, John Heil demande : « Qu'est-ce que n'est pas rien, exactement ? Qu'est-ce qui ne serait pas rien ? » (Heil 2013, 174) Heil suggère que la réponse dépend de notre compréhension du Big Bang. Bruce Reichenbach (B. Reichenbach 2017) déclare que si nous inversons la direction de notre vision et regardons dans le temps, nous découvrons que l'univers atteint un état de compression où la densité et la force gravitationnelle sont infinies. Cette singularité unique est le début de l'univers - matière, énergie, espace, temps et toutes lois physiques. Dès que le Big Bang aura initié les lois de la physique elle-même, aucune explication scientifique ou physique de cette singularité ne peut être attendue. Compte tenu de la GR, le Big Bang n'est pas un événement. Un événement se déroule dans un contexte spatio-temporel. Mais le Big Bang n'a pas ce contexte. Par conséquent, le Big Bang ne peut être considéré comme un événement physique qui se produit à un moment donné. Grünbaum soutient cette position en affirmant que les événements ne peuvent résulter que d'autres événements : « Puisque la singularité du Big Bang est techniquement un non-événement et que t = 0 n'est pas un moment *bona fide* de son apparition, la singularité ne peut être

l'effet d'aucune cause causes en cas de causalité de l'événement ou de causalité de l'agent ... la singularité t = 0 ne peut avoir de cause. » (Grunbaum 1994)

Silk propose d'éliminer l'objection de Grünbaum en élargissant la notion d'« événement » en éliminant l'exigence qu'elle soit relationnelle, dans un contexte spatio-temporel. (Silk 2001, 456) Dans le Big Bang, l'univers espace-temps commence et continue d'exister dans un temps mesurable après la singularité initiale. Ainsi, le Big Bang peut être considéré soit comme l'événement du début de l'univers, soit comme un état dans lequel « deux points quelconques de l'univers observable étaient arbitrairement proches l'un de l'autre ».

Basé sur la logique de Grünbaum que la singularité du Big Bang ne soit pas un événement, Bruce Reichenbach explique que, dans la mesure où les événements n'apparaissent que d'autres événements, les événements postérieurs au Big Bang ne peuvent en être l'effet, ce qui ne donne lieu à aucun événement, ce qui est absurde. (B. Reichenbach 2017)

2.3 Y a-t-il des singularités ?

Il n'existe pas une définition largement acceptée de la singularité. La physique devrait dicter quelle définition de la singularité utiliser, bien que plusieurs définitions puissent coexister sans problèmes.

Erik Curiel et Peter Bokulich soulèvent la question de savoir ce que signifierait attribuer « existence » à une structure singulière dans l'une des possibilités disponibles. (Curiel and Bokulich 2018) Ils analysent la possibilité de l'existence des chemins incomplets dans un espace-temps relativiste maximal en un point de l'espace, où le chemin pourrait être prolongé en le traversant. Cependant, ils tiennent compte du fait que s'il y a un échec dans nos conceptions d'une singularité spatiale, l'échec ne se produit pas dans l'espace cosmique du monde actuel, mais plutôt dans la description théorique de l'espace-temps.

Les ondes gravitationnelles sont des perturbations de la courbure espace-temps générées par les masses accélérées, prédites par Einstein (propagation à la vitesse de la lumière des modifications des courbes espace-temps dues aux objets en mouvement accéléré). (Einstein 1918) Au fur et à mesure du passage de l'onde, les distances entre objets augmentent et diminuent à une fréquence correspondant à celle de l'onde. Les ondes gravitationnelles transportent de l'énergie sous forme de rayonnement gravitationnel. Les systèmes d'étoiles à neutrons binaires sont supposés être une source puissante d'ondes gravitationnelles pendant leur fusion, en raison de la très forte accélération de leurs masses. (LIGO Scientific Collaboration and Virgo Collaboration et al. 2017)

Les ondes gravitationnelles nous permettent d'observer la fusion des TN et éventuellement d'autres objets exotiques dans l'univers lointain. (Krauss, Dodelson, and Meyer 2010)

Dans la géométrie espace-temps, les modèles FLRW avec la matière ordinaire ont une singularité dans un temps fini dans le passé. Les théorèmes de singularité (S. W. Hawking and Ellis 2008) établissent que l'existence d'une singularité initiale est robuste : au lieu d'être spécifiques à FLRW ou à d'autres modèles très symétriques, les singularités sont génériques dans des modèles qui vérifient des hypothèses physiques plausibles. (Smeenk and Ellis 2017)

Les théorèmes de singularité établis dans les années 1960 (S. W. Hawking and Ellis 2008) montrent que l'univers est fini dans le passé dans une vaste classe de modèles cosmologiques. Les particularités du passé, indiquées par l'existence de certaines géodésies non extensibles de longueur limitée, doivent être présentes dans les modèles comportant un certain nombre de caractéristiques plausibles. Intuitivement, en extrapolant vers l'arrière à partir de la présente, une géodésique non extensible atteint, à une distance finie, un bord au-delà duquel elle ne peut pas être étendue. Il n'y a pas de « temps cosmique » défini de manière unique, mais la longueur maximale de ces courbes reflète l'époque finie de l'univers. Les théorèmes de singularité s'appliquent plausiblement à l'univers observé, dans le domaine de la relativité générale. (Smeenk and Ellis 2017)

3. L'ontologie des singularités

Peter Bokulich et Erik Curiel affirment que la relativité générale (RG) permet les singularités et que nous devons comprendre l'ontologie si nous voulons comprendre la nature de l'espace et du temps dans l'univers d'aujourd'hui. (Curiel and Bokulich 2018) Bien que certains physiciens pensent que les singularités indiquent un échec de la RG, d'autres pensent que les singularités ouvrent un nouvel horizon dans la cosmologie, avec de réels phénomènes physiques pouvant contribuer à un progrès profond dans notre compréhension du monde.

Parmi les définitions des singularités est mise en évidence la possibilité que certains espace-temps contiennent des chemins incomplets (la plus acceptée), celui du manque de points et de la pathologie de la courbure. Un *chemin* dans l'espace-temps est une chaîne continue d'événements. Les chemins des plus importants théorèmes de singularité représentent les trajectoires possibles des particules et des observateurs (« lignes d'univers »). Un chemin incomplet et inextensible implique qu'après une période de temps finie, le sujet de ce chemin « sort du monde », disparaît ; ou vice versa, cela peut paraître de rien. (Curiel and Bokulich 2018) Bien qu'il n'y ait pas de contradiction logique ou physique dans ces situations, (Sfetcu 2018) la disparition ou l'apparition soudaine d'une entité dans l'espace-temps est une « singularité ». C'est ce qui peut arriver dans le cas d'un chemin incomplet et inextensible d'une longueur finie et d'une durée de vie finie. Peter Bokulich et Erik Curiel proposent que, pour obtenir des résultats concluants, nous devrons limiter la classe d'espace-temps en question à l'espace-temps qui est *étendu au maximum* (ou il est seulement *maximum*).

En ce qui concerne le type d'incomplétude du chemin relatif aux singularités, il y a beaucoup de controverse. Geroch démontre qu'un espace-temps peut être complètement géodésique tout en possédant un chemin temporel incomplet d'une accélération totale limitée - c'est-à-dire un chemin inextensible dans l'espace-temps, viable, le long duquel un observateur pourrait expérimenter juste une quantité finie du temps propre. (Geroch 1968) Exploitant cette idée, Earman la combine avec la notion

de « longueur affine généralisée » pour donner une définition semi-officielle des singularités : « Un espace-temps maximal est singulier si et seulement s'il contient un chemin de longueur inextensible affine généralisée finie ». (J. Earman 1995, 36)

De nombreuses discussions sur la structure singulière de l'espace-temps relativiste partent de l'idée qu'une singularité représente un point ou un ensemble de points qui, dans un sens ou dans l'autre, « manquent » de l'espace-temps, que l'espace-temps a un « trou » en lui. Peter Bokulich et Erik Curiel suggèrent donc de définir un espace-temps avec des points qui lui manquent si et seulement s'il contient des chemins incomplets et inextensibles, puis d'essayer d'utiliser ces chemins incomplets pour construire des points correctement situés dans l'espace-temps, rendant ainsi les chemins extensibles. Ces points seraient alors nos singularités.

De nombreux physiciens et philosophes estiment qu'une construction est actuellement recherchée pour conférer un statut ontologique clair aux singularités en tant qu'entités.

Ontologie des trous noirs

Gustavo E. Romero considère l'espace-temps comme l'émergence de la composition ontologique de tous les événements, et peut être représenté par un concept. La source du champ gravitationnel dans les équations de la RG, le champ du tenseur T_{ab}, représente les propriétés physiques des objets matériels, l'énergie et la quantité de mouvement de tous les systèmes non gravitationnels. Dans le cas d'une masse ponctuelle M et en supposant une symétrie sphérique, la solution de l'équation représente un trou noir Schwarzschild. Un trou noir est conçu comme une zone causale spatio-temporelle déconnectée du reste de l'espace-temps ; ce qui caractérise le trou noir est sa taille et donc sa courbure. Aucun événement dans cette région ne peut influencer des événements extérieurs à la région. Les événements dans le trou noir sont toutefois déterminés de manière causale par des événements passés, de sorte qu'un trou noir ne représente pas une déviation par rapport aux causalités classiques.

Le déterminisme comme une hypothèse ontologique considère que tous les événements sont donnés. Le déterminisme ne nécessite pas de causalité et n'implique pas de prévisibilité. L'état actuel de l'Univers est l'effet de son passé et la cause de son avenir. Romero considère que RG présuppose l'existence de tous les événements représentés par une variété. Il s'agit donc d'une théorie ontologiquement déterministe, mais néanmoins épistémologiquement indéterminée. L'existence de singularités dans l'espace-temps n'implique pas un échec du déterminisme ontologique, mais seulement un échec de la prévisibilité, mais ce ne sont pas les éléments de l'espace-temps lui-même.

Le présentisme soutient que le futur et le passé n'existent que comme des changements survenus ou se produiront dans le présent et qu'ils n'ont pas de véritable existence. L'éternalisme présuppose que le passé et le futur existent réellement, pas seulement en tant que changements survenus ou se produiront avec le présent. Le présentisme est incompatible avec l'existence des singularités. (Romero 2014) À cet égard, Romero soutient que les trous noirs peuvent être utilisés pour montrer que le présentisme offre une image erronée du substrat ontologique du monde.

L'argument du trou

L'argument du trou est apparu pour la première fois dans les travaux d'Einstein sur la relativité générale en 1913. L'argument du trou exploite une propriété de la relativité générale, sa covariance générale. Les subjectivistes croient que la diversité des événements a une existence indépendante des champs définis sur eux ; les événements ont des identités quelles que soient les propriétés de la métrique ; la différence entre l'espace-temps est donc une différence physique réelle, même si rien d'observable ne permet de distinguer les deux espace-temps. De plus, toutes les différences n'apparaissent qu'à l'intérieur. John D. Norton considère cela comme un grave échec du déterminisme ; (Norton 2012) le trou peut être spécifié pour être aussi petit que possible, et aucune spécification d'espace-temps en dehors du trou ne peut fixer les propriétés à l'intérieur. Il en résulterait que les différences entre les deux espace-temps ne sont que des différences dans la description mathématique,

décrivant toutes les deux la même réalité physique. Norton en déduit qu'un substantivalisme de la variété est impensable.

Il n'y a pas des singularités

Les singularités sont généralement considérées comme un défaut profond de la RG. Les singularités peuvent conduire à un échec du déterminisme, car les lois « s'effondrent » dans un certain sens. Christopher Smeenk et George Ellis affirment que cette préoccupation ne concerne que certains types de singularités. (Smeenk and Ellis 2017) Les espace-temps relativistes qui sont globalement hyperboliques ont des surfaces Cauchy et les données initiales correspondantes sur ces surfaces constituent une solution unique dans l'espace-temps. La menace pour le déterminisme est plus nuancée : les lois ne s'appliquent pas à la « singularité elle-même », même si l'évolution ultérieure est complètement déterministe et que plusieurs types de singularités menacent plus sérieusement le déterminisme. La présence des singularités établit que RG est incomplet. La présence d'une singularité dans un modèle cosmologique indique que « l'espace-temps, tel que décrit par RG, prend fin : il n'y a aucun moyen d'étendre l'espace-temps par singularité, sans violer les conditions mathématiques nécessaires pour que les équations de champ soient bien définies. Toute description des conditions physiques « avant le Big Bang » doit reposer sur une théorie qui remplace RG et permet une extension par singularité. »

Gustavo E. Romero soutient qu'il n'y a pas des singularités physiques dans l'espace-temps. Les modèles singuliers avec espace-temps n'appartiennent pas à l'ontologie du monde, car ce sont des solutions défectueuses des équations de champ d'Einstein. La complexité des équations non linéaires du champ et l'interprétation du champ tenseur métrique ont suscité des inquiétudes quant aux hypothèses ontologiques de la théorie. Le concept d'espace-temps a été introduit par Minkowski (1908) et appartient plus à l'ontologie qu'à la physique. Une construction formelle de l'espace-temps peut être obtenue à partir d'une base ontologique de chaque chose (Bergliaffa, Romero, and Vucetich

1997) ou des événements. (Romero 2013b) Romero part de l'hypothèse ontologique de base que l'espace-temps est la composition ontologique de tous les événements, donc une entité émergente représentée par un concept.

Conclusions

Hawking et Ellis sont en accord avec l'éternalisme, affirmant que chaque solution de l'équation d'Einstein englobe toute l'histoire d'un univers - pas seulement une image de la situation actuelle, mais tout un espace-temps, éventuellement matérialisé. (S. W. Hawking and Ellis 2008)

Dans l'argument de Romero, l'ontologie est une classe d'entités acceptées par une certaine théorie. Quine considère que l'ontologie est le domaine des variables liées à une théorie, donc la classe de référence de la théorie. Et la relativité générale n'est pas une théorie de l'espace-temps, mais du champ gravitationnel et des interactions qu'il détermine. « L'espace-temps est une propriété ontologique émergente du système formé par toutes les existences, quelles qu'elles soient. En raison de l'universalité unique de la gravité, les modèles spatio-temporels peuvent être utilisés pour représenter le champ gravitationnel en relativité générale. Plus précisément, la connexion affine de l'espace-temps représente la puissance du champ et la métrique représente le potentiel gravitationnel. » (Romero 2013c)

Les singularités de la relativité générale ont suscité de nombreux problèmes philosophiques, y compris leur définition (en termes de chemins incomplets, de points manquants ou de pathologie de courbure) et leur signification. Si les singularités ont une ontologie, ou s'il s'agit des limites de nos modèles, respectivement la relativité générale.

Un trou noir transforme la matière en une entité purement gravitationnelle. Inversement, une fois évaporée, la courbe d'espace se transforme en matière ordinaire. (Curiel and Bokulich 2018) Ainsi, les trous noirs sont une source importante pour l'étude de l'ontologie de l'espace-temps et de la matière ordinaire, ainsi que des problèmes conceptuels sous-jacents à la relativité générale. Ou si l'espace-

temps est dynamiquement abstrait (espace de Hilbert) ou plus fondamental, peut-être une entité émergente n'appartenant qu'à une théorie physique.

Gustavo E. Romero (Romero 2013c) affirme que l'existence des solutions singulières dans une théorie indépendante de fond telle que la relativité générale est une conséquence des contradictions au niveau de la base axiomatique de la théorie. Cette contradiction découle de l'approximation du continuum adoptée pour modéliser le champ gravitationnel. Une théorie discrète devrait être développée, à partir de laquelle la relativité générale (et les notions habituelles de l'espace et du temps) peut apparaître comme une sorte de médium. Cela implique un **changement ontologique majeur**. La gravité quantique est considérée par lui comme une théorie sur les relations entre les événements de base et l'émergence ontologique de l'espace-temps et de la gravité. La gravité quantique serait une théorie tellement fondamentale qu'elle pourrait être considérée comme une ontologie plutôt que physique. La nature discrète du substrat ontologique espace-temps peut être formée d'événements atomiques. L'ontologie de la gravité quantique et le monde, dans cette perspective, seraient une série d'événements de base.

Ces dernières années, les recherches se sont étendues des singularités classiques des théories de Penrose et Hawking au nouveau paradigme des singularités faibles et à la théorie de Choptuik de la réduction critique. (Rendall 2005) L'accélération cosmologique implique des violations de l'état d'énergie et nécessite une révision des théorèmes des singularités. Avec la matière noire et l'énergie noire, cela suppose un modèle cosmologique en expansion qui se transforme en une « grande déchirure ». (Starobinsky 1999)

L'étude des singularités spatio-temporelles dans la relativité générale classique n'en est encore qu'au début. La physique des trous noirs et la philosophie des singularités cosmologiques sont encore des domaines inexplorés. Face aux singularités, la science reconnaît ses limites. La philosophie peut aider beaucoup ici.

Bibliographie

Arnowitt, Richard, Stanley Deser, and Charles W. Misner. 1962. "The Dynamics of General Relativity." *General Relativity and Gravitation* 40 (9): 1997–2027. https://doi.org/10.1007/s10714-008-0661-1.

Berger, Beverly K. 2002. "Numerical Approaches to Spacetime Singularities." https://doi.org/10.12942/lrr-2002-1.

Bergliaffa, Santiago E. Perez, Gustavo E. Romero, and Hector Vucetich. 1997. "Steps towards an Axiomatic Pregeometry of Space-Time." *ArXiv:Gr-Qc/9710064*. http://arxiv.org/abs/gr-qc/9710064.

Brans, C., and R. H. Dicke. 1961. "Mach's Principle and a Relativistic Theory of Gravitation." *Physical Review* 124 (3): 925–35. https://doi.org/10.1103/PhysRev.124.925.

Brown, Harvey R. 2015. *Physical Relativity: Space-Time Structure from a Dynamical Perspective*. Oxford University Press. http://www.oxfordscholarship.com/view/10.1093/0199275831.001.0001/acprof-9780199275830.

Carroll, Sean, and Sean M. Carroll. 2004. *Spacetime and Geometry: An Introduction to General Relativity*. Addison Wesley.

Cassirer, Ernst. 1921. "Zur Einstein'schen Relativitätstheorie: Erkenntnistheoretische Betrachtungen." 1921. https://books.google.ro/books/about/Zur_Einstein_schen_Relativit%C3%A4tstheorie.html?id=I60-AAAAYAAJ&redir_esc=y.

Chandrasekhar, Subrahmanyan. 1998. *The Mathematical Theory of Black Holes*. Clarendon Press.

Clarke, C. J. S. 1976. "Space-Time Singularities." *Communications in Mathematical Physics* 49 (1): 17–23. https://doi.org/10.1007/BF01608632.

Curiel, Erik. 1999. "The Analysis of Singular Spacetimes." *Philosophy of Science* 66: S119–45. https://doi.org/10.1086/392720.

Curiel, Erik, and Peter Bokulich. 2018. "Singularities and Black Holes." In *The Stanford Encyclopedia of Philosophy*, edited by Edward N. Zalta, Summer 2018. Metaphysics Research Lab, Stanford University. https://plato.stanford.edu/archives/sum2018/entries/spacetime-singularities/.

Droz, S., W. Israel, and S. M. Morsink. 1996. "Black Holes: The inside Story." *Physics World* 9: 34–37. http://adsabs.harvard.edu/abs/1996PhyW....9...34D.

Duhem, Pierre, Jules Vuillemin, and Louis de Broglie. 1991. *The Aim and Structure of Physical Theory*. Translated by Philip Wiener. 9932nd edition. Princeton: Princeton University Press.

Earman, J. 1995. "Bangs, Crunches, Whimpers, and Shrieks." ResearchGate. 1995. https://www.researchgate.net/publication/272771355_Bangs_Crunches_Whimpers_and_Shrieks.

Earman, John. 1992. *World Enough and Space-Time: Absolute versus Relational Theories of Space and Time*. Cambridge, Mass.: A Bradford Book.

Ehlers, Jürgen. 1973. "Survey of General Relativity Theory." 1973. https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-94-010-2639-0_1.

Einstein, Albert. 1918. *Über Gravitationswellen*. Akademie der Wissenschaften.

Ellis, G. F. R., and A. R. King. 1974. "Was the Big Bang a Whimper?" *Communications in Mathematical Physics* 38 (2): 119–56. https://doi.org/10.1007/BF01651508.

Esfeld, Michael, and Vincent Lam. 2008. "Moderate Structural Realism about Space-Time." *Synthese* 160 (1): 27–46. https://doi.org/10.1007/s11229-006-9076-2.

———. 2011. "Ontic Structural Realism as a Metaphysics of Objects." In *Scientific Structuralism*, edited by Alisa Bokulich and Peter Bokulich, 143–159. Springer Science+Business Media.

Gambini, Rodolfo, Javier Olmedo, and Jorge Pullin. 2013. “Quantum Black Holes in Loop Quantum Gravity.” https://doi.org/10.1088/0264-9381/31/9/095009.
Geroch, R. 1968. “Local Characterization of Singularities in General Relativity.” *Journal of Mathematical Physics* 9: 450–65. https://doi.org/10.1063/1.1664599.
Giulini, D. 2006. “Algebraic and Geometric Structures in Special Relativity.” In *Special Relativity*, 45–111. Lecture Notes in Physics. Springer, Berlin, Heidelberg. https://doi.org/10.1007/3-540-34523-X_4.
Goswami, Rituparno, Pankaj S. Joshi, and Parampreet Singh. 2005. “Quantum Evaporation of a Naked Singularity.” https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.96.031302.
Grünbaum, Adolf. 1970. “Space, Time and Falsifiability Critical Exposition and Reply to ‘A Panel Discussion of Grünbaum’s Philosophy of Science.’” *Philosophy of Science* 37 (4): 469–588.
Grunbaum, Adolf. 1994. “‘Some Comments on William Craig’s’ Creation and Big Bang Cosmology".” *Philosophia Naturalis* 31 (2): 225–236.
Grünbaum, Adolf. 2012. *Philosophical Problems of Space and Time: Second, Enlarged Edition*. Springer Science & Business Media.
Havas, Peter. 1964. “Four-Dimensional Formulations of Newtonian Mechanics and Their Relation to the Special and the General Theory of Relativity.” *Reviews of Modern Physics* 36 (4): 938–65. https://doi.org/10.1103/RevModPhys.36.938.
Hawking, S. W. 1966. “The Occurrence of Singularities in Cosmology.” *Proceedings of the Royal Society of London. Series A, Mathematical and Physical Sciences* 294 (1439): 511–21. http://www.jstor.org/stable/2415489.
Hawking, S. W., and G. F. R. Ellis. 2008. *The Large Scale Structure of Space-Time*. 21. printing. Cambridge Monographs on Mathematical Physics. Cambridge: Cambridge Univ. Press.
Hawking, S. W., and R. Penrose. 1970. “The Singularities of Gravitational Collapse and Cosmology.” *Proceedings of the Royal Society of London. Series A, Mathematical and Physical Sciences* 314 (1519): 529–48. http://www.jstor.org/stable/2416467.
Hawking, Stephen. 2012. “The Beginning of TIme.” Stephen Hawking. 2012. http://www.hawking.org.uk/the-beginning-of-time.html.
Heil, John. 2013. “Contingency.” *Goldschmidt* 2013.
Hilbert, D. 1917. “Die Grundlagen der Physik. (Zweite Mitteilung).” *Nachrichten von der Gesellschaft der Wissenschaften zu Göttingen, Mathematisch-Physikalische Klasse* 1917: 53–76. https://eudml.org/doc/58973.
Howard, Don. 1996. “Relativity, Eindeutigkeit, and Monomorphism: Rudolf Carnap and the Development of the Categoricity Concept in Formal Semantics.” *Origins of Logical Empiricism* 16.
Howard, Don A. 2017. “Einstein’s Philosophy of Science.” In *The Stanford Encyclopedia of Philosophy*, edited by Edward N. Zalta, Fall 2017. Metaphysics Research Lab, Stanford University. https://plato.stanford.edu/archives/fall2017/entries/einstein-philscience/.
Huggett, Nick, and Carl Hoefer. 2018. “Absolute and Relational Theories of Space and Motion.” In *The Stanford Encyclopedia of Philosophy*, edited by Edward N. Zalta, Spring 2018. Metaphysics Research Lab, Stanford University. https://plato.stanford.edu/archives/spr2018/entries/spacetime-theories/.
Kerr, Roy P. 2007. “Discovering the Kerr and Kerr-Schild Metrics.” *ArXiv E-Prints* 0706: arXiv:0706.1109. http://adsabs.harvard.edu/abs/2007arXiv0706.1109K.
Krauss, Lawrence M., Scott Dodelson, and Stephan Meyer. 2010. “Primordial Gravitational Waves and Cosmology.” *Science (New York, N.Y.)* 328 (5981): 989–92. https://doi.org/10.1126/science.1179541.

Ladyman, James, and Don Ross. 2007. *Every Thing Must Go: Metaphysics Naturalized*. Oxford University Press.

Lam, Vincent, and Michael Esfeld. 2012. "The Structural Metaphysics of Quantum Theory and General Relativity." *Journal for General Philosophy of Science / Zeitschrift Für Allgemeine Wissenschaftstheorie* 43 (2): 243–258.

LIGO Scientific Collaboration and Virgo Collaboration, B. P. Abbott, R. Abbott, T. D. Abbott, F. Acernese, K. Ackley, C. Adams, et al. 2017. "GW170817: Observation of Gravitational Waves from a Binary Neutron Star Inspiral." *Physical Review Letters* 119 (16): 161101. https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.119.161101.

LIGO Scientific Collaboration, and the Virgo Collaboration. 2016. "Observation of Gravitational Waves from a Binary Black Hole Merger." *Physical Review Letters* 116 (6). https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.116.061102.

Misner, Charles, Kip S. Thorne, John Wheeler, and David Kaiser. 2017. *Gravitation*. Princeton, N.J: Princeton University Press.

Moulay, Emmanuel. 2012. *The Universe and Photons*. FQXi Foundational Questions Institute. http://www.fqxi.org/data/essay-contest-files/Moulay_Photon_2.pdf.

Norton, John D. 2012. "What Can We Learn About the Ontology of Space and Time From the Theory of Relativity?"

Overbye, Dennis. 2017. "Cosmos Controversy: The Universe Is Expanding, but How Fast?" *The New York Times*, 2017, sec. Science. https://www.nytimes.com/2017/02/20/science/hubble-constant-universe-expanding-speed.html.

———. 2018. "Scientists Hear a Second Chirp From Colliding Black Holes." *The New York Times*, 2018, sec. Science. https://www.nytimes.com/2016/06/16/science/ligo-gravitational-waves-einstein.html.

Pacucci, Fabio, Andrea Ferrara, Andrea Grazian, Fabrizio Fiore, Emanuele Giallongo, and Simonetta Puccetti. 2016. "First Identification of Direct Collapse Black Hole Candidates in the Early Universe in CANDELS/GOODS-S." *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 459 (2): 1432–39. https://doi.org/10.1093/mnras/stw725.

Penrose, Roger. 1965. "Gravitational Collapse and Space-Time Singularities." *Physical Review Letters* 14: 57–59. https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.14.57.

———. 1969. "Gravitational Collapse: The Role of General Relativity." *Nuovo Cimento Rivista Serie* 1. http://adsabs.harvard.edu/abs/1969NCimR...1..252P.

Pooley, Oliver. 2012. "Substantivalist and Relationalist Approaches to Spacetime." Preprint. 2012. http://philsci-archive.pitt.edu/9055/.

Reichenbach, Bruce. 2017. "Cosmological Argument." In *The Stanford Encyclopedia of Philosophy*, edited by Edward N. Zalta, Winter 2017. Metaphysics Research Lab, Stanford University. https://plato.stanford.edu/archives/win2017/entries/cosmological-argument/.

Reichenbach, Hans. 1928. *Philosophie der Raum-Zeit-Lehre*. Walter de Gruyter.

Rendall, Alan D. 2005. "The Nature of Spacetime Singularities." *ArXiv:Gr-Qc/0503112*, 76–92. https://doi.org/10.1142/9789812700988_0003.

Romero, Gustavo E. 2013a. "Adversus Singularitates: The Ontology of Space–Time Singularities." *Foundations of Science* 18 (2): 297–306.

———. 2013b. "From Change to Spacetime: An Eleatic Journey." *Foundations of Science* 18 (1): 139–48. https://doi.org/10.1007/s10699-012-9297-4.

———. 2013c. "The Ontology of General Relativity." *ArXiv:1301.7330 [Gr-Qc, Physics:Physics]*. http://arxiv.org/abs/1301.7330.

———. 2014. "Philosophical Issues of Black Holes." *ArXiv:1409.3318 [Astro-Ph, Physics:Gr-Qc, Physics:Physics]*. http://arxiv.org/abs/1409.3318.

Roos, Matts. 2008. "Expansion of the Universe - Standard Big Bang Model." *ArXiv E-Prints* 0802: arXiv:0802.2005. http://adsabs.harvard.edu/abs/2008arXiv0802.2005R.

Ryckman, Thomas A. 2018. "Early Philosophical Interpretations of General Relativity." In *The Stanford Encyclopedia of Philosophy*, edited by Edward N. Zalta, Spring 2018. Metaphysics Research Lab, Stanford University. https://plato.stanford.edu/archives/spr2018/entries/genrel-early/.

Schilpp, Paul Arthur, and Paul Arthur Schilpp. 1959. *Albert Einstein : Philosopher-Scientist*. 1st Harper Torchbook ed. New York : Harper. https://trove.nla.gov.au/work/10548922.

Schlick, Moritz. 1921. "Kritizistische Oder Empiristische Deutung Der Neuen Physik?" *Société Française de Philosophie, Bulletin* 26 (n/a): 96.

Schutz, Bernard F., and Director Bernard F. Schutz. 1985. *A First Course in General Relativity*. Cambridge University Press.

Sfetcu, Nicolae. 2018. "Buclele Cauzale În Călătoria În Timp." https://doi.org/10.13140/RG.2.2.21222.52802.

Silk, Joseph. 2001. *The Big Bang, Third Edition*. Subsequent edition. New York, NY: W H Freeman & Co.

Smeenk, Christopher, and George Ellis. 2017. "Philosophy of Cosmology." In *The Stanford Encyclopedia of Philosophy*, edited by Edward N. Zalta, Winter 2017. Metaphysics Research Lab, Stanford University. https://plato.stanford.edu/archives/win2017/entries/cosmology/.

Starobinsky, A. A. 1999. "Future and Origin of Our Universe: Modern View." *ArXiv:Astro-Ph/9912054*. http://arxiv.org/abs/astro-ph/9912054.

Szabados, László B. 2004. "Quasi-Local Energy-Momentum and Angular Momentum in GR: A Review Article." *Living Reviews in Relativity* 7: 4. https://doi.org/10.12942/lrr-2004-4.

Townsend, P. K. 1997. "Black Holes." https://arxiv.org/abs/gr-qc/9707012.

Wald, Robert M. 1984. "General Relativity, Wald." 1984. http://press.uchicago.edu/ucp/books/book/chicago/G/bo5952261.html.

Weinberg, Steven. 1972. *Gravitation and Cosmology: Principles and Applications of the General Theory of Relativity*. Wiley.

Weingard, Robert. 1976. "On the Ontological Status of the Metric in General Relativity." The Journal of Philosophy. 1976. https://doi.org/10.2307/2025012.

Weyl, Hermann, and H. Weyl. 1993. *Raum, Zeit, Materie: Vorlesungen über allgemeine Relativitätstheorie*. Edited by Jürgen Ehlers. 8th edition. Berlin: Springer.

Wheeler, John Archibald. 1990. *A Journey Into Gravity and Spacetime*. Scientific American Library.

Wright, E. L. 2009. "Frequently Asked Questions in Cosmology." 2009. http://www.astro.ucla.edu/~wright/cosmology_faq.html#BBevidence.